(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 1
2025

**УДК:** 669.14.018.4:621.785 10.70769/3030-3214.SRT.3.1.2025.25

# СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХРОМОМОЛИБДЕНОВЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ

***Хасанов Абдурашид Салиевич***
*Заместитель главного инженера по науке и инновациям Алмалыкского АО «КМК», Алмалык, Узбекистан*
*E-mail: abdurashidsoli@mail.ru*

***Халикулов Уткир Мирзакамолович***
*Доцент, PhD, Алмалыкский филиал НИТУ «МИСиС», Алмалык, Узбекистан*
*E-mail: utkirhm@mail.ru*

***Аннотация.*** *Разработана технология по достижению высокой прочности и износостойкости хромомолибденовых сталей. Экспериментальные исследования показали, что кратковременный интенсивный нагрев с последующим быстрым охлаждением существенно повышает эксплуатационные характеристики сплавов. Изучено влияние температурно-временных параметров термической обработки на изменение структуры и характеристик углеродистой хромомолибденовой стали. Инжекционное литье даёт возможность изготавливать компоненты с высокой степенью точности и воспроизводимости, что особенно важно для серийного производства.*

***Ключевые слова:*** *хромомолибденовые сплавы, прочность, износостойкость, термообработка, индукция, конструкция, спекание, модификатор.*

# XROMMOLIBDENLI PO‘LATLARNING SIRT MUSTAHKAMLIGINI O‘RGANISH UCHUN STRUKTURAVIY TADQIQOTLAR

***Xasanov Abdurashid Salievich***
*Olmaliq “KMK” AJ Bosh muhandisining ilm fan va innovatsiyalar bo‘yicha o‘rinbosari, Olmaliq, O‘zbekiston*

***Xoliqulov O‘tkir Mirzakamolovich***
*NITU "MISiS" Olmaliq filiali dotsenti, PhD, Olmaliq, O‘zbekiston*

***Annotatsiya.*** *Xrommolibdenli po‘latlarning yuqori mustahkamlikka va yeyilishga chidamliligiga erishish texnologiyasi ishlab chiqilgan. Eksperimental tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki, qisqa muddatli intensiv qizdirish va keyinchalik tez sovutish qotishmalarning ekspluatatsion xususiyatlarini sezilarli darajada oshiradi. Uglerodli xromomolibdenli po‘latning strukturasi va xarakteristikalarining o‘zgarishiga termik ishlov berishning harorat-vaqt parametrlarining ta’siri o‘rganildi. Injeksion quyish yuqori darajadagi aniqlik va takrorlanuvchanlikka ega bo‘lgan komponentlarni ishlab chiqarish imkonini beradi, bu ayniqsa seriyali ishlab chiqarish uchun muhimdir.*

***Kalit so‘zlar:*** *xrommolibden qotishmalari, mustahkamlik, yeyilishga chidamlilik, termik ishlov berish, induksiya, konstruksiya, kuydirish, modifikator.*

# STRUCTURAL STUDIES OF CHROMOLIBDEN STEELS TO STUDY THE POSSIBILITY OF SURFACE HARDENING

***Khasanov Abdurashid Salievich***
*Deputy Chief Engineer for Science and Innovations, Almalyk JSC KMK, Almalyk, Uzbekistan*

***Khalikulov Utkir Mirzakamolovich***
*Docent, PhD, NITU "MISiS" Almalyk branch, Almalyk, Uzbekistan*

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 1
2025

***Abstract.*** *A technology for achieving high strength and wear resistance of chromolibden steels has been developed. Experimental studies have shown that short-term intensive heating followed by rapid cooling significantly increases the operational characteristics of alloys. The influence of temperature-time parameters of heat treatment on the change in the structure and characteristics of carbon chromomolybdenum steel was studied. Injection casting allows for the production of components with a high degree of accuracy and reproducibility, which is especially important for serial production.*
***Keywords:*** *chromolibden alloys, strength, wear resistance, heat treatment, induction, construction, sintering, modifier.*

**Введение.** Горнодобывающая и металлургическая промышленность Узбекистана переживает устойчивый рост, что требует внедрения инновационных решений для производства и обработки металла. Хромомолибденовые сплавы играют решающую роль в производстве компонентов горного оборудования, таких как колесные базы, ковши и внутренние вкладыши шаровых мельниц. Эти сплавы ценятся за их исключительные механические свойства, включая высокую твердость, износостойкость и способность выдерживать значительные эксплуатационные нагрузки. Спрос на них также обусловлен их коррозионной стойкостью и способностью сохранять свойства при повышенных температурах.

Современные исследования направлены на разработку сплавов с улучшенным химическим составом, повышенной пластичностью и оптимизированными параметрами термообработки. Особое внимание уделяется использованию вторичного сырья и совершенствованию методов его обработки для снижения производственных затрат, и минимизации воздействия на окружающую среду. Оптимизация температурных режимов аустенитной фазы и совершенствование технологий легирования хромом и молибденом способствуют повышению прочности и долговечности готовых изделий.

**Методология.** Текущие исследования направлены на совершенствование процессов литья и последующей механической обработки для минимизации внутренних дефектов и повышения однородности материала. Кроме того, исследования по внедрению нанодисперсных модификаторов показали многообещающие результаты в повышении прочности, коррозионной стойкости и способности выдерживать переменные нагрузки. Также изучаются передовые технологии, позволяющие повысить плотность материала, снизить остаточные напряжения и продлить срок службы изделий.

Для достижения превосходной прочности и износостойкости хромомолибденовых сталей были разработаны передовые технологии термообработки и поверхностного упрочнения. Индукционный нагрев (HF) и газопламенная обработка позволяют упрочнять крупные детали, такие как ведущие колеса горных экскаваторов, что значительно увеличивает срок их службы. Кроме того, лазерное упрочнение позволяет локализованно изменять свойства поверхности без ущерба для внутренней структуры, расширяя область применения этих методов.

Экспериментальные исследования показывают, что кратковременный интенсивный нагрев с последующим быстрым охлаждением значительно улучшает эксплуатационные характеристики сплава. Выбор охлаждающей среды — воздуха, масла или солевых ванн — позволяет адаптировать их к конкретным требованиям отрасли. Внедрение новых режимов отпуска доказало свою эффективность в снижении остаточных напряжений, что напрямую влияет на долговечность деталей. Контролируя скорость охлаждения и фазовый состав, можно достичь оптимального баланса между твердостью и ударной вязкостью.

Кроме того, для дальнейшего повышения износостойкости и уменьшения коррозионного растрескивания изучаются такие методы, как азотирование и карбон-азотирование. Комбинированные процессы обработки, включающие последовательные этапы закалки, отпуска и поверхностного упрочнения, продемонстрировали значительное улучшение эксплуатационных характеристик. Особое внимание уделяется изучению температурных режимов и их влияния на распределение остаточных нап-

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 1
2025

ряжений, поскольку равномерное охлаждение имеет решающее значение для создания прочных сплавов.

Современные производственные процессы все чаще включают аддитивные технологии и литье металла под давлением (MIM), особенно для получения изделий сложной геометрии. Процесс MIM, в котором используются металлические порошки и полимерные связующие, обеспечивает высокую точность при минимизации дефектов конструкции. Усовершенствованные методы прессования и спекания еще больше улучшают характеристики сплава за счет уменьшения пористости и повышения прочности материала.

Разработка новых компонентов связующего и технологий спекания значительно сократила количество внутренних дефектов, обеспечив однородную структуру материала. Инновационные методы контроля плотности обеспечивают соответствие промышленным стандартам, что делает MIM особенно выгодным для массового производства. Продолжаются исследования по разработке композитных порошков с нанодисперсными карбидами, которые значительно улучшают механические свойства.

Кроме того, изучаются многослойные порошковые структуры для достижения различных механических свойств в зависимости от условий эксплуатации. Также проводятся исследования различных связующих материалов и их влияния на усадку при спекании. В настоящее время разрабатываются методы последующей обработки, такие как лазерная закалка и химическое травление, для повышения долговечности деталей и устойчивости к воздействию факторов окружающей среды.

Хромомолибденовая сталь 35ХМЛ является перспективным сплавом для применения в MIM-системах, известным своей превосходной прочностью, устойчивостью к термическим нагрузкам и коррозии. Анализ химического состава спеченных деталей подтвердил соответствие ГОСТ 4543 и международным стандартам. Испытания на ударную вязкость и коррозионную стойкость показали высокую эксплуатационную надежность.

Технология горячего литья под низким давлением, широко используемая с 1950-х годов для изготовления керамических изделий, в 1990-х годах эволюционировала в методы литья под высоким давлением, распространив свое применение на металлические детали. Процесс литья под давлением предполагает использование специально приготовленной смеси порошков и полимерных связующих, известной как исходное сырье, которая вводится в полость формы для формирования желаемого компонента. После отверждения под высоким внешним давлением полимерное связующее удаляется, а пористая металлическая деталь подвергается спеканию с образованием конечного продукта. Обработка после спекания, такая как механическая обработка, термическая обработка (НТ) и химико-термическая обработка (СТТ), дополнительно повышает прочность, ударную вязкость и износостойкость.

Несмотря на более чем тридцатилетний опыт успешного применения и разработки за рубежом, технология полимерной композиции была внедрена в Узбекистане менее десяти лет назад. Несмотря на обширные научные и теоретические исследования, конкретные прикладные данные, включая характеристики материалов, составы и технологические режимы, остаются ограниченными.

Высококачественная среднеуглеродистая хромомолибденовая сталь 35ХМЛ, соответствующая ГОСТ 4543, обладает превосходной прочностью и пластичностью, что делает ее пригодной для изготовления ответственных деталей, работающих при температурах до 400°C. Исследования структуры и свойств непрерывнолитой и деформируемой стали марки 35ХМЛ, наряду с ее зарубежными аналогами, в различных условиях термической обработки (НТ) и химико-термической обработки (СТТ) хорошо документированы. Однако исследования структурных характеристик спеченной порошковой стали 35ХМЛ по-прежнему ограничены несколькими основными режимами термообработки. Как уже отмечалось, компоненты, изготовленные методом MIM, могут обладать свойствами, отличными от свойств, полученных с использованием традиционных методов порошковой металлургии.

**Результаты и обсуждение.** Важно прог-

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 1
2025

нозировать оптимальные технологические параметры для получения высококачественных изделий с особыми свойствами. Целью данного исследования является установление взаимосвязи между структурой и свойствами спеченной хромомолибденовой стали 35ХМЛ, полученной методом MIM, и режимами ее последующей термической обработки (НТ) и химико-термической обработки (СТТ).

Объектами исследования являются образцы, изготовленные из среднеуглеродистой гипоэвтектоидной хромомолибденовой стали, полученной методом полимерной композиции из порошков стали марки 35ХМЛ. Образцы для испытания на ударную вязкость по методу Шарпи были изготовлены в промышленных условиях.

Сырьем для формования и спекания служила полимерно-порошковая смесь полимерной композиции, состоящая на 61,8% по объему из стального порошка марки 4140 с размерами частиц от 2 до 16 мкм и средним медианным диаметром D50 = 6-8 мкм. В качестве связующего в полимерной композиции используется смесь воска и полиолефинового полимера, предназначенная для термического обезжиривания растворителем. Растворитель удаляет восковой компонент, образуя пористую структуру, которая способствует беспрепятственному выделению газообразных продуктов пиролиза при последующем нагреве. Этот двухэтапный процесс обезжиривания предотвращает образование трещин и неоднородностей, сохраняя геометрию спеченной детали.

Закалка в масле и отпуск при различных температурах привели к образованию мартенситной и дисперсно-перлитной структур, что позволило достичь оптимального баланса твердости и пластичности. В результате восьмичасовых экспериментов по азотированию был получен азотированный слой толщиной 20 мкм, что значительно повысило износостойкость. Дополнительные этапы термообработки позволили свести к минимуму внутренние дефекты и улучшить распределение напряжений.

Проведено металлографическое исследование спеченной стали марки 110ХМЛ, а её химический состав был определён с использованием оптической эмиссионной спектроскопии (OES) на спектрометре. Определение содержания углерода выполнялось с применением высокочастотного анализатора, который задействует метод микроволнового горения в кислородном потоке с последующим инфракрасным анализом дымовых газов.

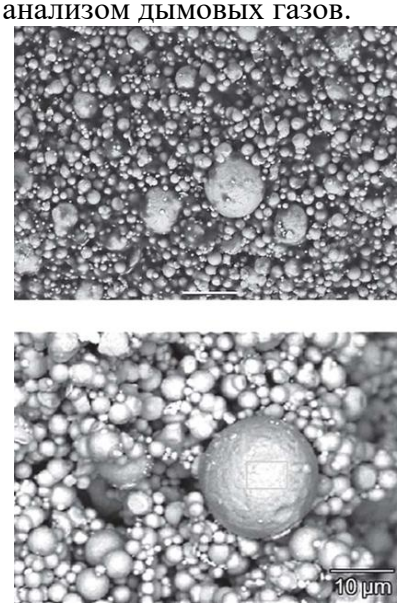


***Рис.1. Изображения поверхности излома полуфабрикатов, полученных из сырья полимерная композиция:***
*а — «зеленая» часть; б — «коричневая» часть.*

Для термической обработки стали марки 35ХМЛ использовалась лабораторная муфельная печь Nabiterm, оборудованная цифровым микропроцессорным контроллером температуры. Процесс закалки осуществлялся в масле, служащем закалочной средой.

Измерение твердости стали проводилось в соответствии с ГОСТ 9450 при температуре (20 ± 3)°C методом Виккерса на микротвердомере. Значения твердости рассчитывались на основе восстановленного углубления после испытания алмазным индентором с квадратно-пирамидальной формой. При этом твердость поверхности после азотирования измерялась при нагрузке 0,0098 Н (1 кгс), а остальные измерения выполнялись с нагрузкой 0,0981 Н (10 кгс).

Спеченная, но необработанная сталь марки 35ХМЛ, полученная по технологии MIM, характеризуется достаточно крупнозернистой ферритно-перлитной микроструктурой (см. рис. 2), типичной для гипоэвтектоидных сталей. Микроструктура содержит примерно 55% перлита, при

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 1
2025

этом феррит формирует плотную сетку вдоль границ зерен перлита, что указывает на нормализованное состояние материала.

При изменении параметров спекания, таких как температура, продолжительность и скорость охлаждения, сталь марки 35ХМЛ может приобретать бейнитную структуру [7]. Эти наблюдения подтверждают, что условия обработки существенно влияют на конечную микроструктуру и механические свойства стали.

Таблица 1.

***Химический состав, % мас., полученной полимерно-композиционным методом стали и его сравнение зарубежными аналогами***

| Сталь 35ХМЛ и ее аналоги | C | Si | Mn | Ni | Cr | Mo | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Спеченный аналог стали 35ХМЛ, полученный MIM-методом из зарубежного сырья | (0,4102 ± 0,0045) | 0,321 ± 0,012 | 1,015 ± 0,057 | 0,031 ± 0,009 | 1,128 ± 0,017 | 0,227 ± 0,015 | 96,54 ± 0,057 |
| Сталь 35ХМЛ | 0,35...0,42 | 0,17...0,37 | 0,35...0,65 | До 0,03 | 0,90...1,30 | 0,20...0,30 | Остальное |
| К [11] | 0,30...0,50 | До 0,60 | До 1,00 | - | 0,80...1,20 | 0,20...0,30 | |
| Зарубежный аналог | 0,38...0,43 | 0,15...0,3 | 0 0,75...1,0 | До 0,05 | 0,80...1,10 | 0,15...0,25 | |

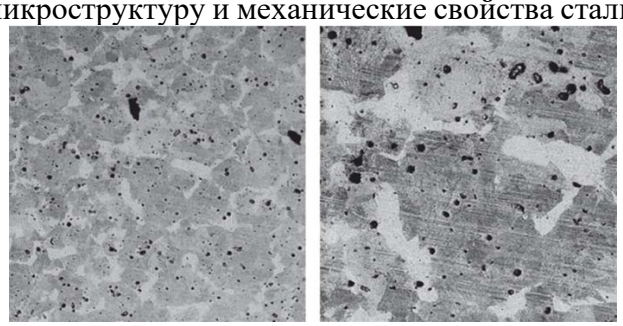

***Рис.2. Изображения микроструктуры, спеченной стали 35ХМЛ, в полученных инжекционным методом образцах.***

Исследование химического состава спеченных композиционных деталей из аналогов стали 35ХМЛ показало, что их химический состав достаточно точно обеспечивается в пределах допусков, установленных стандартами на сталь 35ХМЛ и ее зарубежные аналоги (табл. 1).

Полученные методом полимерной композиции образцы спеченной стали 35ХМЛ были подвергнуты закалке в масло и последующему отпуску при четырех различных температурах, в соответствии с режимами, указанными в табл. 2. Влияние температуры отпуска на микроструктуру стали 35ХМЛ после закалки в масло показано на рис. 3, а влияние на твердость — на рис. 4.

После низкотемпературного отпуска в спеченной стали 35ХМЛ наблюдается (рис. 3, а) структура мелкоигольчатого мартенсита, что подтверждается ее высокой твердостью (рис. 4). Термическое улучшение, включающее закалку и высокий отпуск, способствует формированию в спеченной стали 35ХМЛ (рис. 3, б—г) характерных микроструктур дисперсного перлита и троостита, что обеспечивает оптимальное сочетание прочностных и пластических характеристик материала.

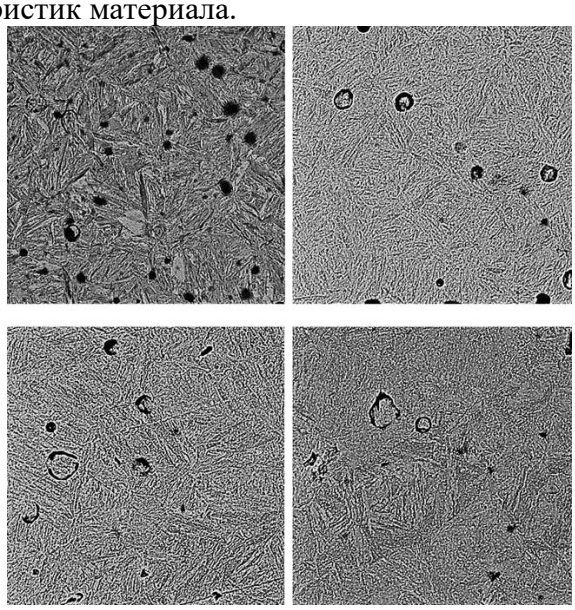

***Рис.3. Влияние температуры отпуска на микроструктуру стали 35ХМЛ после закалки с температуры 850 °С:***

*А — 160 °С; б — 400 °С; в — 500 °С; г — 600 °С.*

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 1
2025

**Заключение.** Рациональная термообработка и химико-термическая модификация стали 35ХМЛ обеспечивают высокие механические характеристики и долговечность деталей. Использование MIM-технологий в сочетании с традиционными методами металлообработки открывает новые перспективы для промышленного производства.

Показано, что выбор рациональных режимов термической и химико-термической обработки деталей из стали 35ХМЛ, полученных по MIM-технологии, может обеспечить высокие прочностные свойства при серийном производстве ответственных малогабаритных деталей, с характерными для MIM-деталей сложной геометрической конфигурацией, высоким качеством поверхностей и размерной точностью.

Установлено, что химический состав спеченных MIM-деталей достаточно точно обеспечивается в пределах допусков, установленных отечественным и зарубежными стандартами на сталь 35ХМЛ и ее зарубежные аналоги.

Полученная MIM-методом среднеуглеродистая хромомолибденовая сталь после закалки в масло и последующего отпуска при различных температурах обладает твердостью, не уступающей твердости высококачественной конструкционной стали 35ХМЛ по ГОСТ 4543.

Азотирование в течение 8 ч деталей из спеченной стали 35ХМЛ обеспечивает формирование на поверхности высокотвердого слоя нитридной фазы толщиной около 20 мкм, что обеспечивает высокую износостойкость азотированных MIM-изделий.

Развитие методов упрочнения, оптимизация режимов термообработки и внедрение нанотехнологий позволяют создавать износостойкие и долговечные компоненты для горно-металлургической отрасли Узбекистана, обеспечивая её дальнейшее развитие.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фомина О.Н. Порошковая металлургия. Энциклопедия международных стандартов. М.: Протектор, 2015. 384 с.
2. Medvedovski E., Peltsman M. Low pressure injection moulding mass production technology of complex shape advanced ceramic components // Advances in Applied Ceramics. 2012. Vol. 111. No. 5—6. P. 333—344. DOI: 10.1179/1743676112Y.0000000025.
3. German R.M. Metal powder injection molding (MIM): key trends and markets // In: Handbook of metal injection molding / Ed. by German R.M. Woodhead publishing limited, 2012. P. 1—25. DOI: 10.1533/9780857096234.1.
4. Dovydenkov V.A., Zvereva O.S. Process of producing parts of complex shape by molding and sintering iron and iron oxide powders with a binder // Powder metallurgy and metal ceramics. 2014. Vol. 52. No. 9—10. P. 594—599. DOI: 10.1007/s11106-014-9565-7.
5. Parkhomenko A.V., A mosov A.P. Samboruk A.R. et al. Development of domestic powder granulate with a polyformaldehyde-based binder for MIM technology // Russian journal of non-ferrous metals. 2015. Vol. 56. No. 1. P. 68—72. DOI: 10.3103/S1067821215010149.
6. Semenov A.B., Gavrilenko A.E., Semenov B.I. Nextgeneration casting technologies and their adaptation and development in Russia: I. At the beginning of a new technological paradigm // Metally. 2016. No. 13. P. 1231—1240. DOI: 10.1134/S0036029516130152.
7. Coleman A.J. et al. Effect of Par ticle Size Distribution on Processing and Properties of Metal Injection Moulded 4140 and 4340 // Sandvik Osprey Ltd.: Technical papers. 2011. URL: https://www.materials.sandvik/globalassets/global/effect-of-particle-size-distribution-on-rocessing-and-properties-of-mim-4140-and-4340.pdf (дата обращения: 10.08.2018).
8. BASF. Technical Specifications of Catamold 42CrMo4 URL: http://www.catamold.de/cm/internet/Catamold/en/content/Microsite/Catamold/Technische_Informationen_/Technische_Specifications_Overview (дата обращения: 10.08.2018).